

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛУЧЕНИЕ ИОНАМИ Kr НА ПОВЕРХНОСТНЫЕ СВОЙСТВА СПЛАВА Zr1%Nb

Прихода М.А.¹

Руководитель - д.т.н. Литвиненко В.В.²

¹Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина

²Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, г.
Харьков, Украина
prykhodam@inbox.ru

Разработка новых ядерных материалов предполагает необходимость проведения тестовых экспериментов по исследованию их радиационной стойкости к воздействию излучения активной зоны реактора. Среди спектра продуктов распада ядерного топлива порядка 16% приходится на благородные газы ксенон и криптон. [1-3]. Исследование сосредоточено на изучении изменения поверхностных прочностных свойств сплава (1% Nb, основа Zr, % массовые) после облучения высокоэнергетичными ионами $^{86}\text{Kr}^{15+}$. Облучение образца толщиной 200 мкм проведено с помощью ускорителя ИЦ-100 ЛЯР ОИЯИ с энергией ионов 107 МэВ в интервале флюенсов 10^{13} см^{-2} - 10^{14} см^{-2} . Для получения информации о состоянии поверхностного слоя исследовалась зависимости распределения нанотвердости, модуля упругости по глубине внедрения индентора [4]. Для изучения механических характеристик поверхности использовался метод наноиндентирования с помощью прибора Nano Indenter G200, с применением алмазной трехгранной пирамидки Берковича с радиусом затупления при вершине около 20 нм, средняя нагрузка до 10 мН, глубина внедрения индентора – от нулевого отсчета до глубины 200 нм. Точность измерения глубины отпечатка $\pm 0,04 \text{ нм}$, а нагрузки на индентор $\pm 75 \text{ нН}$. Отпечатки наносились на расстоянии 15 мкм друг от друга, на каждом образце проводилось по четыре измерения. Прецизионная точность нагружения и измерения смещений обеспечивается электромагнитным приводом зонда и емкостными датчиками перемещений. Обработку полученных экспериментальных данных проводили по анализу нагрузочной кривой методом Оливера и Фарра. На рис. 1 приведен оптический снимок поверхности исследуемого образца.

Особенность действия быстрых тяжелых ионов [5] заключается в том, что при прохождении через твердые тела они создают треки диаметром в несколько нм, внутри которых в течение 10^{-11} – 10^{-10} с уровни ионизации могут достигать 10^{22} см^{-3} , а температуры 5000К. Таким образом, облучение представляет собой сильно локализованный импульсный отжиг, где активными факторами могут быть и нагрев, и ионизация. Согласно расчетам по программе SRIM (www.srim.org), пробег

таких ионов в циркониевом сплаве составляет около 11 мкм, а потери на ионизацию в исследуемом образце были 14,5 кэВ/нм при упругих потерях 0.16 смещения/нм.



Рис. 1. Вид поверхности сплава после механической полировки и последующего ионного облучения

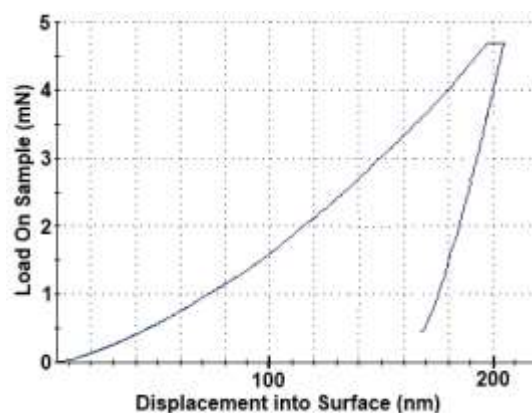


Рис. 2. Кривая нагрузки на образец во время измерения образца

Благодаря результатам измерения прочностных характеристик была получена информация о состоянии поверхностного слоя. Измеренная экспериментально нанотвердость и модуль упругости облученных образцов с флюэнсами 10^{13} , 10^{14} и исходного образца. Важно заметить, что существенные отличия значений выше упомянутых величин для необлученного образца и модифицированного ионным пучком с флюэнсом 10^{13} не наблюдаются в пределах экспериментальной ошибки. На рис.2 представлена кривая нагружения, на рис. 3 - кривые зависимости нанотвердости, на рис. 4 - модуля упругости от глубины внедрения алмазного индентора. Из рис.3 видно, что на глубине до 8 нм наблюдается снижение или существенное замедление роста нанотвердости, что свидетельствует о влиянии поверхностных дефектов (например, шероховатости). При дальнейшем погружении индентора на глубину 40 - 50 нм происходит резкий рост величины нанотвердости. По достижении 50 нм режим деформации меняется с упругого на пластический. При более глубоком погружении тела внедрения начинается пластическое течение под индентором. Начиная с глубины внедрения 50 нм, кривые нанотвердости, как и модуля упругости, выравниваются, и после чего возможна их статистически усредненная оценка. Следует заметить, что устойчивые значения твердости можно получить, начиная с глубин порядка 70 нм.

Из результатов измерений видно, что после облучения ионами на поверхности формируется нанослой с повышенной твердостью. Так, максимальная нанотвердость образцов сплава Zr1%Nb после облучения флюэнсом 10^{14} ион/см² достигает 5,3 ГПа в сравнении с 4,5 ГПа для исходного образца. Причем, значение нанотвердости для облученного

монотонно уменьшается до 4,7 ГПа на глубине 200 нм. Модуль Юнга обработанного образца и немодифицированного отличаются в интервале глубины индентирования до 20 нм. Облученному образцу при флюэнсе 10^{14} и/см² присущий более быстрый рост величины модуля упругости. Значения модуля Юнга для исходного и облученного образцов циркониевого сплава выравниваются после 20 нм и составляют 130 ГПа.

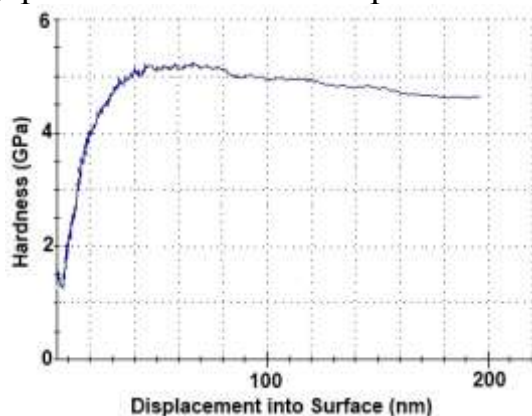


Рис.3. Кривая нанотвердости

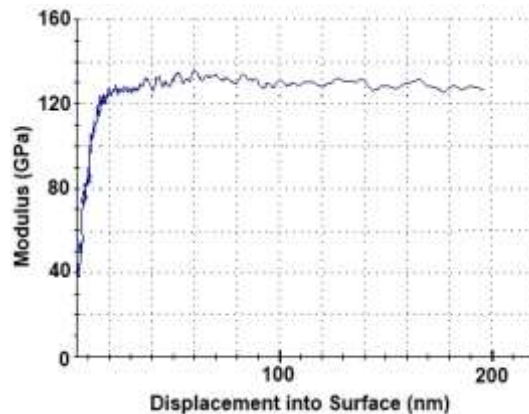


Рис.4. Кривая модуля упругости

Проведенные исследования показали, что облучение поверхности образцов сплава вызывает определенные изменения структуры циркониевого сплава $Zr1\%Nb$, проявляющиеся в изменении макрохарактеристик.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке новых материалов для ядерной энергетики и космической техники.

Выражаем благодарность начальнику сектора №8 Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований д.ф.м.н. В.А. Скуратову за облучение образцов.

Литература

1. D.K. Avasthi. Modification and Characterisation of Materials by Swift Heavy Ions. Defence Science Journal, Vol.59, No.4, July 2009, pp.401-412.
2. D. Kanjilal. Swift heavy ion-induced modification and track formation in materials. Current science, vol. 80, no. 12, 25 JUNE 2001.
3. Ф.Ф. Комаров. Дефектообразование и трекообразование в твердых телах при облучении ионами сверхвысоких энергий. Успехи физических наук, том 173, №12, декабрь 2003г.
4. В.А. Белоус, В.С. Павлов, Г.Н. Толмачева. Наноиндентирование поверхностных слоев материалов. Вопросы атомной науки и техники, №6, 2009, с.146-148.
5. Bernd Schmidt, Klaus Wetzig. Ion–Solid Interactions. Ion Beams in Materials Processing and Analysis, 2013, pp 7-31.